西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展

曾帝[1,3]，吴锦奎[1,2,3*]，李洪源[1,3]，赵求东[1,2]，刘世伟[2,3]，秦甲[1,2]

(1．中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室，甘肃 兰州 730000；2．中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室，甘肃 兰州 730000；3．中国科学院大学，北京 100020)

摘要：借助近年来的相关研究文献对中国西北干旱区降水中氢氧同位素特征和相关科学问题进行了梳理和总结，主要结果：① 西北干旱区降水稳定同位素呈现出显著的季节性变化，夏半年高，冬半年低，充分体现了同位素分布的温度效应；从空间上看，同位素低值区分布在天山等山地，盆地为高值区。② 温度是西北干旱区大气降水同位素组成的主要控制因素；事件降水尺度上部分区域夏季存在降水量效应；地理因素及水汽来源等对大气降水同位素的分布有区域性差异。③ 西北干旱区区域大气降水线斜率和截距均较低，整体显示出干旱的气候特点，但内部地域差异性显著。④ 降水中过量氘值变化幅度大，体现了西北干旱区水汽来源复杂、降水形成时环境要素差异性大的特点；过量氘具有冬高夏低的特点，但由于夏季存在强烈蒸发，部分站点也呈现出冬低夏高的特点。⑤ 西北干旱区降水主要水汽来源为西风带，也会受到季风和极地气团的影响。

关键词：；大气降水；氢氧同位素；时空分布；水汽来源；西北干旱区

广泛存在于自然环境水体中的环境同位素，由于蒸发、凝结、降落、渗透和径流等条件不同，具有不同的特征[1]。降水是水循环中极为重要一环，降水中氢氧同位素的变化为水文过程的演化提供了有效的信息，为水汽来源的示踪、古气候重建、蒸发通量的估算等提供了理论基础[2]。氢氧稳定同位素应用于水的研究始于1950s[3]。1961 年，国际原子能机构（IAEA）和世界气象组织（WMO）建立了全球大气降水同位素观测网（Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP），开始了全球性的大气降水同位素的长期研究。随着同位素相关理论和同位素分析技术的发展，大气降水中的氢氧同位素已经成为研究复杂水文循环过程的有效示踪剂[4-5]。科学家们利用大气降水中的稳定同位素信息对全球的大气降水及其与之相关的水文过程进行了大量研究工作，并取得了一系列成果[6-12]。

中国西北干旱区位于欧亚大陆中心，主要包括新疆全部、甘肃河西走廊、内蒙古阿拉善高原、青海和宁夏的少部分地区，大致为年平均降水量<200mm 且地理位置在贺兰山以西的区域（图 1）[13-14]。西北干旱区山脉与盆地、平原相间，地形条件复杂。区域冬季盛行西北风，水汽输送主要来自大西洋和北冰洋的西风气流，而夏季来自亚洲季风环流系统的暖湿气流也有一定影响[9,-15]。值得注意的是，相邻的青藏高原特别是山区冰川、积雪和降水蒸发产生的水汽也是区域水汽的重要来源[15]。因此，特殊的地形和气候等条件使其成为世界上最为干旱的地区之一。目前，西北干旱区进行了很多有关降水同位素的研究，这些研究大多基于站点的降水同位素数据，由于站点分布较为零散，研究时间较为分散，对该区域的复杂地形、区域性的大气环流和再蒸发过程等条件缺乏整体性的把握。因此，对西北干旱区整体的降水氢氧同位素的研究进展进行回顾和总结，显得十分迫切和必要。本文在较为系统地回顾西北干旱区有关降水稳定同位素的相关研究的基础上，总结已经开展研究工作的区域和站点，探讨了区域大气降水中氢氧同位素的研究进展，以期为相关水文过程的研究提供一定的参考。

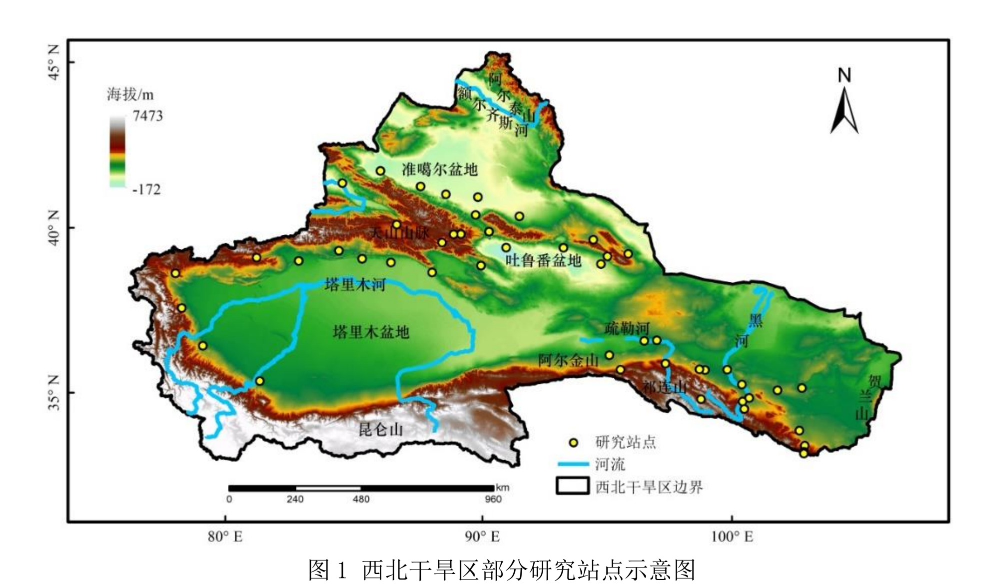


图 1 西北干旱区部分研究站点示意图

Fig.1 Sketch map of some research stations of arid regions in the Northwestern China

1 已有研究的区域和站点

在西北干旱区，降水氢氧同位素研究主要集中于天山地区以及河西走廊。对于天山地区的研究始于 1980s 初甚至更早[16-17]，且主要集中于乌鲁木齐河流域[18]，近年来其他一些流域也有所涉及[19-20]。河西走廊的研究主要集中于黑河[21-22]、疏勒河[23-26]以及石羊河[27]等流域。相对天山地区以及河西走廊，内蒙古阿拉善高原、青海和宁夏地区降水氢氧同位素的研究较少[28]。

利用 GNIP 提供的资料，部分学者对处于西北干旱区的乌鲁木齐[29]、和田[30]、张掖[31]站点的降水氢氧同位素进行了研究（图 1）。但是除香港外，我国包括西北干旱区在内的所有 GNIP 站点在 2000s 都暂停了观测[32]，数据时效性已然不够，而且从站点的数目上来说，难以满足科研的需要。与 GNIP 站点类似，自 2004 年起，依托中国生态系统研究网络（Chinese Ecosystem Research Network, CERN）各野外台站建立了中国大气降水同位素监测网络（CHNIP）[33]，利用其观测数据，柳鉴容等[34]对西北干旱区的 $\delta^{18}O$ 分布格局进行了系统分析。随着观测和测量技术的进步，许多学者在西北干旱区基于国家气象监测网络、水文监测网络、中国科学院等科研机构野外台站乃至其他形式（如当地居民协助）等，以事件降水尺度对降水进行采样，并对降水中氢氧同位素进行分析，获取了大量详实而有效的降水氢氧同位素数据[35-51]（图 1）。

2 样品采集与测试方法

GNIP 站点对样品的采集是以国际原子能机构和世界气象组织的要求为准，用标准雨量器进行降水样品的收集[29,52-53]。CHNIP 站点降水采样时，在每一个野外站的室外放置一套由聚乙烯瓶和漏斗组成的集雨器，同时在漏斗上放一个乒乓球以防降水样品蒸发。降雪采样则是在每次降雪后，使用桶进行雪样的收集，使其在室内温度条件下融化。采样结束之后将月度的两种样品分别装入 50mL 聚乙烯瓶中，使样品充分混合，样品测试在中国科学院地理科学与自然资源研究所环境同位素实验室内完成，通过 Finnigan MAT253 质谱仪进行样品测定，使用 TC/EA 法测定 δD 和 $\delta^{18}O$ 的含量，其测量精度分别为±1‰和±0.3‰[54]。

依托国家气象监测网络开展的研究中所采用的降水采集方法大同小异：先使用自制的雨水收集器进行降水样品的采集，在降水事件结束以后，将其装入采样瓶内，进行密封和低温保存，以防止蒸发，最后将样品带到实验室内进行氢氧同位素的测定。不同降水样品在雨水

收集器的组成、采样瓶的材质和大小、储存方式和环境、样品测定的仪器等方面存在差别（表1）。由于降水样品采集是由人工完成，在采样时间、方法等方面的差异势必会影响样品中氢氧同位素的精度，加之测定条件的差异性，使得各研究区降水氢氧同位素的测定结果受到影响，测定值可能存在差值。因此，在降水样品采集和测定过程中，对其进行规范化显得非常重要。

表 1 西北干旱区样品采集与测试条件

Tab.1 List of Sample Collection and Testing Conditions in Arid Areas of Northwest China

样品采集地	采样容器	样瓶规格与材质	存储条件	密封和过滤	测试仪器	来源文献
黑河上游	—	8mL 硼硅玻璃瓶	2℃冷藏	Parafilm 封口膜	PicarroL2130-i 液态水同位素分析仪	[55]
武威等	直径 20cm 铁皮桶	聚乙烯瓶	-15℃冷藏	密封	—	[56]
柴达木盆地东部	—	4mL 玻璃瓶	冷藏	Parafilm 封口膜	PicarroL2130-i 液态水同位素分析仪	[37]
阿拉善地区	标准雨水收集器	聚乙烯瓶	—	0.45 微孔膜过滤器	PicarroL2130-i 液态水同位素分析仪	[57]
天山山脉	直径 20cm 漏斗雨量计	60mL 高密度聚乙烯瓶	冷冻	密封	DLT-100 液态水同位素分析仪	[58]
乌鲁木齐	标准雨量器	500mL/50mL 标准容器	—	密封	MM-903 气体同位素质谱仪	[29]
乌鲁木齐河流域	—	—	-18℃冷藏	—	MAT-253 气体同位素质谱仪	[59]
艾比湖流域	—	250mL 高密度聚乙烯瓶	冷冻	封口膜	DLT-100 液态水同位素分析仪	[50]
乌鲁木齐河流域	—	塑料水样瓶	冷藏	蜡融化密封	MAT-252 气体同位素质谱仪	[60]
天山等	雨量筒	5mL 冻存管	冷冻	Parafilm 封口膜	DLT-100 液态水同位素分析仪	[61]
西北干旱区	聚乙烯瓶和漏斗组成的雨水收集器	50mL 聚乙烯瓶	—	—	MAT-253 气体同位素质谱仪	[54]

3 降水氢氧同位素研究进展

3.1 降水中氢氧同位素的时空分布

前面已提到，西北干旱区地形条件及水汽来源复杂，这就决定了其大气降水中氢氧同位素时空分布的复杂性。

西北干旱区降水中氢氧同位素组成见表 2。从表 2 可以看出，整个西北干旱区氢氧同位素值变化幅度大，$\delta^{18}O$ 值范围为-33.4‰~8.5‰，δD 值范围为-263.2‰~59‰，均超出我国氢氧同位素值范围（δD：-190‰~0‰，$\delta^{18}O$：-24‰~2‰）[8]，这可能与 1983 年在西北干旱区仅有乌鲁木齐一个取样点，代表性不够有关。

表 2 西北干旱区部分区域降水中 $\delta^{18}O$ 及 δD 值

Tab.2 Hydrogen and Oxygen Isotopes Data in Precipitation in Arid Areas of Northwest China

样品采集地	所属区域	$\delta^{18}O$Min /‰	$\delta^{18}O$Max /‰	$\delta^{18}O$ 均值 /‰	δDMin /‰	δDMax /‰	δD 均值 /‰	来源文献
艾比湖流域	北疆	-20.2	1.2	—	-148.2	-0.5	—	[49]
准噶尔盆地南缘	北疆	-20.1	1.1	—	-162.9	7.3	—	[62]
乌鲁木齐	北疆	-28.0	1.8	—	-204.5	-8.9	—	[53]
塔里木盆地南缘	南疆	-32.9	8.5	-9.4	-263.2	52.0	-65.0	[63]
疏勒河流域	河西走廊	-26.1	8.1	-5.4	-201.8	46.0	-39.4	[43]
托来河流域	河西走廊	-23.4	5.5	-7.2	-196.2	33.1	-48.6	[44]
黑河流域	河西走廊	-33.4	6.5	—	-254.0	59.0	—	[35]
石羊河流域	河西走廊	-27.3	6.1	-6.0	-206.8	40.1	-35.5	[64]

古浪河流域	河西走廊	-23.7	7.1	-5.8	-175.9	37.1	-32.4	[38]
祁连山乌鞘岭	河西走廊	-26.8	4.0	-8.7	-199.9	17.0	-53.3	[41]
河西走廊右缘	右缘	-23.7	-1.0	-7.1	-157.2	-2.3	-50.9	[65]
德令哈	柴达木盆地	-17.2	0.3	-7.5	125.5	13.2	-50.5	[36]
西北干旱区	西北干旱区	-24.6	1.6	—	-172.7	-14.6	—	[54]

注：根据张自超等[66]确定的同位素地质测试数据处理的有效位数，氧同位素的有效位数均保留一位小数。

西北干旱区降水中氢氧同位素的时间特征表现为夏半年富集，冬半年贫化。柳鉴容等[34]基于 CHNIP 数据发现，降水中氢氧同位素在西北地区的总体表现为，1—7 月不断富集，8—12 月逐渐贫化，最大值出现夏季, 最小值在冬季；黄锦忠等[67]对乌鲁木齐、张掖等地的 GNIP 数据分析后发现，$\delta^{18}O$ 的月均变化趋势总体上基本一致，1—5 月的同位素值增加较为明显，变化幅度超过 10‰，5—9 月之间波动频繁，总体上降水中 $\delta^{18}O$ 呈现出夏半年高，冬半年低的特点；Wang 等[68]采用几种模式的 GCM 对中亚干旱地区的降水同位素进行了模拟和验证后发现，每种 GCM 模式都能很好地模拟降水中同位素组成的季节性，降水中 $\delta^{18}O$ 值夏季较大，冬季较低；李佳芳等[69]研究发现，河西走廊中段的降水氢氧同位素总体表现为，1—7 月不断富集，8—12 月逐渐贫化，最大值出现在夏季，最小值出现在冬季；Rao 等[51]研究发现，在阿拉善高原基于日尺度的降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值也随季节变化，夏季较大，冬季较小，并且这种变化趋势在月尺度降水更加明显，这种夏高冬低的特征与周边地区相似。

西北干旱区降水中氢氧同位素的空间分布特征可概括为天山、阿尔泰山等山地为低值区，盆地及河西走廊为高值区。Liu 等[70]利用我国 55 个地区已有的 $\delta^{18}O$ 年降水资料，以区域地形和大气降水 $\delta^{18}O$ 为基础，建立的整个中国的降水 $\delta^{18}O$ 格局也发现，在西北干旱区，氢氧同位素的低值区分布在天山、阿尔泰山等山地，盆地则普遍为高值区，这与表 2 实测的降水中氢氧同位素分布的空间特征较为一致。同时，在各区域内部也存在着空间差异：刘洁遥等[71]发现，新疆地区的 $\delta^{18}O$ 无论在夏季风还是冬季风期间都是由和田至乌鲁木齐不断走低；Zhang 等[72]发现，天山地区南坡降水中氢氧同位素值高于北坡；Wang 等[58]也发现同样的特征，并将其成因解释为天山南坡降水量较北坡少，因此，强烈的蒸发使降水中氢氧同位素更为富集；在河西走廊，冬半年降水中氢氧同位素由新疆地区向东输送的过程中不断富集，但夏半年水汽来源复杂，空间分布特征也更为复杂[67]。

3.2 影响降水中氢氧同位素的因素

Dansgaard[2]根据降水同位素数据首先分析总结出了影响降水中稳定同位素时空分布的相关因素，并将其总结为温度效应、纬度效应、海拔效应、雨量效应、大陆效应等方面，后续研究也大都是通过这几个方面分析其影响因素。我国地域辽阔，地理环境十分复杂，气候条件也存在很大差异，不同地区影响因素不同，但区域性十分明显[73]。

西北干旱地区同位素变化与气温变化关系密切，即体现为温度效应（表 3）。西北干旱地区针对 $\delta^{18}O$ 与气温的关系所做的大量研究表明，不同研究站点都具有不同程度的温度效应。乌鲁木齐（海拔 500 m）和大西沟（海拔 4200 m）属于同一个流域，但两者 $\delta^{18}O$ 与温度的梯度相差较大，一方面反映了海拔（温度）差异，另一方面又反映了地方性对流降水影响的综合结果；刘小康等[45]研究发现，年内尺度上天山地区的 $\delta^{18}O$ 值在夏季偏正，冬季偏负，变化幅度可达 15‰左右，明显受控于温度效应；王圣杰等[74]也发现，新疆天山地区在事件尺度下各采样点降水同位素与气温均存在正相关关系；周海等[75]研究发现，河西走廊临泽站降水 $\delta^{18}O$ 值具有显著的季节变化特征，降水 $\delta^{18}O$ 值对温度的响应显著，随着温度的上升而显著增大，具有明显的温度效应。

表 3　西北干旱区部分取样点 $\delta^{18}O$ 与气温的关系

Tab.3 Relation between $\delta^{18}O$ and Temperature at Some Stations in Arid Areas of Northwest China

样品采集地	拟合方程	相关系数	来源文献

乌鲁木齐	$\delta^{18}O=0.41t-14.08$	0.81	[60]
大西沟	$\delta^{18}O=0.73t-11.97$	0.95	[60]
和田	$\delta^{18}O=0.72t-15.90$	0.73	[30]
天山地区	$\delta^{18}O=0.78t-16.01$	0.73	[74]
临泽站	$\delta^{18}O=0.59t-15.21$	0.78	[75]
黑河西水站	$\delta^{18}O=0.91t-16.64$	0.93	[35]
黑河莺落峡站	$\delta^{18}O=0.76t-18.87$	0.91	[35]
疏勒河流域	$\delta^{18}O=0.63t-14.12$	0.67	[76]
张掖	$\delta^{18}O=0.50t-14.07$	0.64	[69]
敦煌盆地	$\delta^{18}O=0.92t-19.33$	0.85	[37]
阿拉善高原	$\delta^{18}O=0.49t-14.32$	0.67	[51]

西北干旱区降水一般集中在暖季，冷季降水较少。降水量小的冷季，重氢氧同位素值也维持在一个低水平。随着降水量增加，降水中的重氢氧同位素值也不断增大。换句话说，西北干旱区氢氧同位素在季节尺度上并未表现出明显的降水量效应，甚至显示出的是一种反向的降水量效应。这是由于季节尺度上的温度效应过于明显，完全掩盖了降水量效应。在事件降水尺度上，西北干旱区部分地区如河西走廊黑河流域[35]、祁连山东部[40]等地，事件降水中的重氢氧同位素值随降水量的增大而减小，降水量效应依然存在。但越往内陆深处，如疏勒河[76]、柴达木盆地[36]、新疆天山地区[74]等，事件降水的降水量效应也很弱，甚至不存在。

地理因素包括海拔、纬度和经度[63]，是影响降水中氢氧同位素空间分布的重要因素。流域尺度上常存在海拔效应[77]：一般来说，在迎风坡，海拔较低的地区降水中重氢氧同位素更为富集，随着海拔的增加，降水中的氢氧同位素越来越贫化，海拔梯度一般为负梯度[78]。乌鲁木齐河流域[60] 、黑河流域[35]、石羊河流域[79]降水中的 $\delta^{18}O$ 具有明显的从源头到下游逐渐增大的特征。Ma 等[80]对祁连山的海拔效应进行研究发现，该区域的 $\delta^{18}O$ 平均海拔梯度为-0.26 ‰ •(100m)$^{-1}$，且夏季海拔梯度高于冬季。河西地区的 $\delta^{18}O$ 梯度为−0.23 ‰ •(100m)$^{-1}$，δD 的梯度为−1.67 ‰ • (100m)$^{-1}$。但也有研究[81]发现，天山背风一侧 $\delta^{18}O$ 与海拔之间存在 0.12 ‰ • (100m)$^{-1}$ 的的正梯度，与上面出现的负海拔梯度具有相反的特征，这主要是由于受到局地云下二次蒸发和水分循环过程的影响。Li 等[41]还就祁连山南北坡的海拔效应进行了对比研究，发现乌鞘岭南坡的海拔梯度大于北坡，其原因是南坡海拔相对较高，温度较低，通常会导致空气中水汽凝结增加，降水中重同位素逐渐被消耗；另外，北坡更为强烈的云下蒸发，也导致北坡降水中重同位素更为富集。除了海拔效应外，高志发[82]对西北地区的大陆效应进行了研究，其采用张掖、乌鲁木齐 6—9 月实测同位素值计算得到西北地区大陆梯度为-2.9×10^{-3} ‰ • km^{-1}。

以上的影响因素均属于局部的地理因素对降水中氢氧同位素的影响，除此之外，包括形成降水汽团的来源及其性质、水汽压的大小等区域气候的环境背景在某种程度上是决定降水中氢氧同位素组成的另一方面[83]。

很多学者基于区域气候的环境背景对西北干旱区降水中稳定氢氧同位素的影响因素展开了研究。在西北干旱区，就降水汽团的来源及其性质的影响方面，夏季河西走廊地区东部和中部会受到东南季风和西南季风的影响，使其表现出雨量效应，降水中氢氧同位素相对于整个西北干旱区更低[40,84]，冬季由于西北干旱区降水水汽的分馏主要以动力分馏为主，雨滴在降落过程中历经了一定的二次蒸发过程，降水水汽中也混入一定量的由局地再蒸发的水汽，因此在西北干旱区西风的移动路径上，$\delta^{18}O$ 逐渐富集[34,53,85-86]。在天山地区面积较大的绿洲（如乌鲁木齐），再循环水汽约占 16.2%，而通常来自地表蒸发和蒸腾的再循环水汽中氢氧同位素较为贫化，如果再循环水汽对降水的贡献较大，则降水中的稳定同位素可能呈现出因

不断被消耗而逐渐贫化的趋势[87]。

西北干旱区水汽压的大小也对降水中氢氧同位素值产生影响，具体表现为显著正相关关系。李永格等[44]研究发现，托来河流域氢同位素与水汽压之间存在正相关关系，但从托勒站到嘉峪关站，平均水汽压升高，氢同位素与平均水汽压的正相关关系减弱。任雯等[88]基于 GNIP 在我国西北东部站点的数据并结合气象数据研究后发现，在我国西北东部地区，当水汽压饱和差大于 0.52kPa 发生雨滴云下二次蒸发时，$\delta^{18}O$ 随水汽压饱和差呈显著的增加趋势。西北干旱区降水中氢氧同位素值与水汽压大小所表现出的正相关关系，与干旱区特殊的气候环境有关[69]。

3.3 区域大气降水线（LMWL）研究

Craig[89]在全球尺度上研究了降水中氢氧同位素组成，并由此得出了全球大气降水线方程（GMWL），即 $\delta D=8\delta^{18}O+10$；Rozanski 等[90]在 1993 年将其修正为 $\delta D= 8.17\delta^{18}O+10.35$。郑淑蕙等[8]根据 1980 年在国内 8 个台站收集到的降水样品对 δD 和 $\delta^{18}O$ 进行分析，得到了我国大气降水线为 $\delta D=7.9\delta^{18}O+8.2$，与全球大气降水线方程的差别并不大。

在区域尺度上，由于其地理环境和气候条件的不同，地区大气水线（LMWL）的斜率和截距往往与全球大气降水线有着较大的差别，在研究中，更多的是将全球大气水线（GMWL）看做是一条基准线[91]。但这条基准线太过简单，难以满足在实际研究中的需要，因此，产生了基于小区域尺度的大气水线作为地区基准[92]。基于此，许多学者对西北干旱区的地区和站点降水中氢氧同位素值进行了拟合，以获得更为贴切的研究结果。黄天明等[93]根据 GNIP 资料，求得我国西北地区的大气水线为 $\delta D=7.56\delta^{18}O+5.05$（$R^2$=0.97），程中双等[94]也在 GNIP 数据的基础上提出了我国西风带主导区（西北干旱区大部为西风带主导）的大气水线为 $\delta D=7.55\delta^{18}O+6.61$（$R^2$=0.98），两者结果十分相近。

一般来说，降水过程中的蒸发使降水沿着斜率小于 8 的蒸发线而偏离大气降水线[95]，干旱区降水少而蒸发旺盛，斜率和截距会小于全球大气降水线，并且温度越高，蒸发越强烈，湿度越小，斜率和截距越小[96]。西北干旱区部分站点的大气水线见表 4。可以看出，整体上西北干旱区的大部分站点大气降水线的截距和斜率都低于全球大气水线和全国大气水线，反映了西北干旱区气候更为干旱，蒸发具有强烈不平衡的特点[82]。祁连站的斜率为 8.3，高于全球大气降水线的斜率，一个主要原因是因为祁连站海拔高，降水形成时的温度低，基本以固态降水为主，低温使得氘比 $\delta^{18}O$ 在降水中更易富集，同位素分馏偏离平衡，过量氘值显著增加，进一步导致斜率和截距值更大[23]；疏勒河流域的截距较低，是受到水汽循环模式的影响[43]；托来河流域斜率和截距低于同处河西走廊的石羊河流域和排露沟流域，该地区的降水过程可能还受到较为干燥的大气环境所导致的蒸发过程影响[44]；新疆地区大气水线的斜率和截距在西北干旱区最低，体现了干旱区蒸发强烈的气候特点。受云下蒸发影响，在新疆，相对而言在更湿润以及温度更低的天山北部斜率和截距比天山南部更大[58,97]；Li 等[98]在河西地区取样后发现，绿洲地区大气降水线斜率小于山地地区，表明降水在绿洲地区比山区更易受到二次蒸发的影响。

表 4 西北干旱区部分站点 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系

Tab.4 Relation between δD and $\delta^{18}O$ in Arid Areas of Northwest China

样品采集地	大气降水线	相关系数	来源文献
柴达木盆地格尔木	$\delta D=7.8\delta^{18}O+4.5$	0.92	[36]
柴达木盆地德令哈	$\delta D=7.8\delta^{18}O+8.6$	0.99	[36]
河西走廊古浪站	$\delta D=7.4\delta^{18}O+6.8$	0.94	[38]
河西走廊安远站	$\delta D=7.7\delta^{18}O+13.1$	0.96	[38]
河西走廊祁连站	$\delta D=8.3\delta^{18}O+17.1$	0.97	[55]
河西走廊乌鞘岭	$\delta D=7.7\delta^{18}O+11.0$	0.98	[40]

河西走廊排露沟流域	$\delta D=7.7\delta^{18}O+6.4$	0.98	[99]
河西走廊石羊河流域	$\delta D=7.6\delta^{18}O+4.4$	0.96	[79]
河西走廊疏勒河流域	$\delta D=7.3\delta^{18}O+0.4$	0.97	[43]
河西走廊黑河流域	$\delta D=7.8\delta^{18}O+7.6$	0.98	[100]
河西走廊托来河流域	$\delta D=7.3\delta^{18}O+4.2$	0.88	[44]
河西绿洲地区	$\delta D=7.4\delta^{18}O+5.3$	0.95	[98]
河西山地地区	$\delta D=7.5\delta^{18}O+10.4$	0.95	[98]
阿拉善高原	$\delta D=(7.5\pm0.1)\delta^{18}O+(0.8\pm1.2)$	0.94	[51]
阿拉善高原	$\delta D=7.8\delta^{18}O+6.3$	0.96	[57]
新疆江卡站	$\delta D=7.8\delta^{18}O+8.9$	0.98	[50]
新疆天山北坡	$\delta D=7.5\delta^{18}O+2.0$	0.97	[58]
新疆天山南坡	$\delta D=7.2\delta^{18}O-6.5$	0.96	[58]
新疆榆树沟流域	$\delta D=6.6\delta^{18}O-3.0$	0.98	[46]
新疆乌鲁木齐河流域	$\delta D=7.1\delta^{18}O+0.6$	0.98	[59]
新疆艾比湖流域	$\delta D=(6.7\pm0.1)\delta^{18}O-(6.5\pm1.7)$	0.99	[49]

注：根据张自超等[66]确定的同位素地质测试数据处理的有效位数，氧同位素的有效位数均只保留一位小数。

3.4 过量氘和水汽来源研究

过量氘（*d*-excess）被定义为$d=\delta D-8\delta^{18}O$[2]，并且在大部分内陆过量氘值一般接近10‰[89]，有研究表明，其值与降水时的水汽来源地水体蒸发时周围环境空气相对湿度有关，过量氘值大小与水汽源地的相对湿度成反比[101]，正因为过量氘含有水汽源地的重要信息，是水汽团降水中氢氧同位素重要特征的反映，并且在输送过程中其值保持不变，因此，常被学者用来作为追踪水汽来源的示踪剂[102-104]，它与后向轨迹法等为西北干旱区的水汽来源研究起着巨大的作用。干旱区的过量氘值在蒸发过程中不断减小，而在参与强烈蒸发所形成的局地水汽再循环过程中其值不断增大[105]。

新疆地区的过量氘特征比较复杂，部分站点的过量氘具有冷季高暖季低的特点[46,59,106]，Wang 等[46]认为，暖季时新疆地区主要受西风气团控制，此时蒸发强烈，重同位素富集，降水中 $\delta^{18}O$ 值较大而过量氘值较小。但也有部分站点具有相反的冬低夏高的特点[30,53,107]，这可能与当地夏季强烈的水汽再循环有关。南疆地区塔里木盆地南缘江卡站就属于过量氘冬季低夏季高的站点，夏季较高的过量氘值可能与当地夏季降水再度蒸发有关，夏季低海拔被蒸发的水汽（同位素较轻）爬升至山区凝结降水会造成高海拔地点过量氘值增大[50]。

许多学者利用过量氘对新疆地区的水汽来源进行了研究。Wang 等[46]将 $\delta^{18}O$、过量氘示踪与 NCEP/NCAR 再分析数据集结合，发现天山榆树沟流域春季降水水汽主要来源于欧洲和俄罗斯西部，偶尔受到极地水汽的影响，夏季降水水汽主要来源于西风团和盆地内的局部再蒸发水汽。谢泽明[108]对新疆地区进行水汽贡献的定量计算表明，对该地区水汽贡献最大的源区是新疆本地和中亚区域，其水汽源区表现为夏季偏北而冬季偏南的分布特点。牟惟丰[109]对南疆地区水汽来源研究发现，当地的蒸发水汽对低空水汽的供应起较大作用，山区附近水分内循环的方式是流到山下后蒸发的水汽构成以后降水过程的主要水汽来源。孙从建等[61]对亚洲中部高山降水稳定同位素进行分析后发现，该区降水过量氘波动范围较大，降水过程及水汽来源较复杂。同时，水汽来源影响着过量氘值的大小。亚欧大陆北部大部分地区（包括乌鲁木齐等地）的水汽来源于北大西洋，夏季大西洋相对湿度较高，导致由此形成的降水中过量氘值较低，然而，冬季洋面相对湿度较低，降水中过量氘值较高，使天山地区降水中过量氘值具有夏季低、冬季高的特点，而阿尔泰山附近的过量氘则没有明显的季节变化，这可能是水汽输送机制不同的结果，由于该区域水汽来源除了来自大西洋外，还有来自北冰洋的水汽，这一部分水汽是导致阿尔泰山地区与天山地区过量氘季节性差异的最有可能因素

[110]。

总体而言，河西走廊地区的过量氘也具有冬高夏低的特点[41,76,84,100]，其原因归结为，夏季由于西风带强度变大，河西走廊较大程度上受到来自北大西洋暖湿气流的影响，湿度较大，并且此时在一定程度上还受到来自季风的影响，因此此时的降水来源地相对湿度高，过量氘值低，而冬季水汽主要受西风环流和更为干燥的极地水汽共同作用，水汽来源地大气相对湿度降低，造成降水过量氘出现较大值[39,101,111]。但部分地区的过量氘特征与河西走廊并不完全一致，表现出了独特的小区域特点，如石羊河下游青土湖，由于大陆性冷气团和季风同时影响，以及受到不同季节水汽蒸发条件差异及局地人工季节性湖面蒸发补给的影响，使得青土湖降水过量氘出现较大的波动[112]，并没有明显的季节性特点。Li 等[64]研究发现，在石羊河流域的山区，由于温度低，其云下蒸发相对低海拔地区更弱，导致随着海拔的增加，过量氘也随之增加，呈现出明显的海拔效应。Zhao 等[22]对黑河上游过量氘分析后发现，黑河流域上游降水中过量氘与水分来源和局部相对湿度有关，局地气候因素包括降水的季节性及云下蒸发，也在一定程度上影响着过量氘的大小。

对于河西走廊地区的水汽来源有许多学者也进行了研究。郭小燕等[37]通过分析发现，河西走廊的敦煌盆地过量氘变化与乌鲁木齐等地相似，认为其常年受西风控制，在进一步研究后发现，敦煌盆地全年降水水汽主要来源于西风输送，冬季和春季还受到源自西伯利亚和蒙古一带的极地气团的影响，夏季部分降水事件受到西南季风和局地再循环水汽的影响。张应华等[113]研究发现，黑河流域降水事件中过量氘大幅波动，验证了西北内陆上空降水水汽来源以及水汽来源地的蒸发状况和降水条件的复杂性。吴锦奎等[35]利用后向轨迹法并结合降水稳定同位素及过量氘值，以黑河流域的西水站为例，对其水汽来源进行探讨，发现冷季水汽较为单一，主要来源于西风带，而暖季的水汽来源复杂，内陆水汽的补给对区域同位素变化影响很大。赵玮 [76]对疏勒河流域的水汽源地分析表明，西风水汽可能来源于中亚地区或者欧洲大陆高纬度地区，同位素值较低的西风水汽则可能是来源于北大西洋等海洋性水汽，局地再循环水汽大多来自研究区附近区域的蒸发，夏季的西南季风可能来源于印度洋的海洋性水汽，而冬季水汽源地可能为青藏高原。马兴刚等[114]综合分析祁连山东部乌鞘岭氧同位素大气降水方程线和过量 $\delta^{17}O$ 变化后发现，该区域大气降水主要受局地水循环和大陆气团控制，主要受到西风和东南季风携带水汽影响，东南季风携带水汽对于祁连山东部的影响主要集中于夏季。Li 等[115]通过在祁连山中段葫芦沟流域取样，发现了在该流域存在典型的季风降水事件，虽然季风降水频率较低，持续时间较短，但这也证实了祁连山季风降水事件对局地的降水具有一定的贡献。

总体而言，新疆地区主要水汽来源为西风气团及新疆本地再蒸发水汽，且具有夏季偏北冬季偏南的特点；河西走廊常年也受西风控制，冬季会受到极地气团的影响，夏季会受到东南季风、局地再循环水汽以及西南季风的影响。当然，对于西北干旱区新疆以及河西走廊的水汽来源，还有很多学者[56,116-117]对其进行了研究，并得到了相似的结论，但对于柴达木盆地和阿拉善高原的水汽来源相关研究明显缺乏。

4 结论与建议

综上所述，降水中氢氧同位素是研究水循环机理的有效工具，从全球大气降水同位素观测网到中国大气降水同位素监测网络，这一系列同位素观测网络的建立，对于研究整个西北干旱区的同位素时空分布起着巨大的作用。近年来，随着技术的进步，许多学者在西北干旱区不断建立了新的降水同位素研究站点，将同位素景观格局研究不断小尺度化，提高了对整个西北干旱区的认识，但仍存在一些问题需要进一步研究和完善：

(1)西北干旱区地理环境比较复杂，许多地区气候条件十分恶劣，目前来说对该地区降水进行采样比较困难，待对这些区域作进一步研究，在空间上主要集中于新疆以及河西走廊地区，而柴达木盆地、阿拉善高原等地区研究较为缺乏。

(2)降水中氢氧同位素的采集和测定过程在不同研究中具有差异性，可以进一步将采集和测定过程标准化，以获得更为准确的数据。

(3)降水和水汽中氢氧同位素之间的关系有待进一步研究。

(4)目前主要对 $\delta^{18}O$ 进行了研究，由于技术的进步，近年来 $\delta^{17}O$ 也被广泛使用，但在西北干旱区有关 $\delta^{17}O$ 研究较少。

参考文献（References）：

[1] 石辉，刘世荣，赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用[J]. 水土保持学报，2003，17(2): 163-166.[Shi Hui, Liu Shirong, Zhao Xiaoguang. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in water circulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17 (2): 163-166.]

[2] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.

[3] Dansgaard W. The abundance of δO^{18} in atmospheric water and water vapour[J]. Tellus, 1953, 5(4):461-469.

[4] Dutton A, Wilkinson B H, Welker J M, et al. Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}O/^{16}O$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(20): 4121-4146.

[5] Hren M T, Bookhagen B, Blisniuk P M, et al. $\delta^{18}O$ and δD of streamwaters across the Himalaya and Tibetan Plateau: Implications for moisture sources and paleoelevation reconstructions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 288(1-2): 20-32.

[6] 张洪平. 我国大气降水稳定同位素背景值的研究[J]. 勘察科学技术，1989(6): 6-13.[Zhang Hongping. A study on the background value of stable isotopes of atmospheric precipitation in China[J]. Editorial Office of Site Investigation Science and Technology, 1989(6): 6-13.]

[7] 章新平，姚檀栋. 我国部分地区降水中氧同位素成分与温度和降水量之间的关系[J]. 冰川冻土，1994, 16(1): 31-40.[Zhang Xinping, Yao Tandong. Relations of oxygen isotopic composition in precipitation with temperature and precipitation amount in some regions of China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994,16 (1): 31-40.]

[8] 郑淑蕙，侯发高，倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报，1983，34(13): 801-806.[Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. Study on hydrogen and oxygen stable isotopes of atmospheric precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 34(13): 801-806.]

[9] 郭江勇，李耀辉. 中国西北地区夏季降水的气候特征[J]. 干旱区研究，2006，23(3): 489-494.[Guo Jiangyong, Li Yaohui. Climatic characteristics of summer precipitation in northwestern China[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(3): 489-494.]

[10] 陈中笑，程军，郭品文，等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. 大气科学学报，2010, 33(6): 667-679.[Chen Zhongxiao, Cheng Jun, Guo Pinwen, et al.Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, 33(6): 667-679.]

[11] Zhu G F, Li J F, Shi P J, et al. Relationship between sub-cloud secondary evaporation and stable isotope in precipitation in different regions of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(10): 876.

[12] Yang S, Zhang M J, Wang S J, et al. Interannual trends in stable oxygen isotope composition in precipitation of China during 1979–2007: Spatial incoherence[J]. Quaternary International, 2017, 454: 25-37.

[13] 张雪芹，孙杨，郑度，等. 中国干旱区温度带界线对气候变暖的响应[J]. 地理学报，2011，66(9): 1166-1178.[Zhang Xueqin, Sun Yang, Zheng Du, et al. Responses of temperature zone boundaries in the arid region of China to climatic warming[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1166-1178.]

[14] 杨艳芬，罗毅. 中国西北干旱区 TRMM 遥感降水探测能力初步评价[J]. 干旱区地理，2013，36(3): 371-382.[Yang Yanfen, Luo Yi. Evaluation on detective ability of TRMM remote sensing precipitation in arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(3): 371-382.]

[15] 俞亚勋，王劲松，李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析[J]. 冰川冻土，2003，25(2):

149-156. [Yu Yaxun, Wang Jinsong, Li Qingyan. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmosphere over Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 149-156.]
[16] Zhang M J, Wang S J. Precipitation isotopes in the Tianshan Mountains as a key to water cycle in arid central Asia[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2018, 10(1): 27-37.
[17] Okitsugu W, Wu X L, Koichi I, et al. Oxygen isotope characteristics of glaciers in the Eastern Tian Shan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983,5(3): 101-112.
[18] Sun C J, Li W H, Chen Y N, et al. Isotopic and hydrochemical composition of runoff in the Urumqi River, Tianshan Mountains, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 1521-1537.
[19] 曾海鳌,吴敬禄,刘文,等.哈萨克斯坦东部水体氢、氧同位素和水化学特征[J].干旱区地理，2013, 36(4):662-668.[Zeng Haiao, Wu Jinglu, Liu Wen, et al.Characteristics of hydrochemistry and hydrogen, oxygen isotopes of waters in Kazakhstan[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4):662-668.]
[20] Sun C J, Li X, Chen Y, et al. Spatial and temporal characteristics of stable isotopes in the Tarim river basin[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2016, 52(3):281-297.
[21] 胡玥，刘传琨，卢粤晗，等. 环境同位素在黑河流域水循环研究中的应用[J]. 地球科学进展，2014, 29(10): 1158-1166.[Hu Yue, Liu Chuankun, Lu Yuehan, et al. Application of environmental isotopes in understanding hydrological processes of the Heihe river basin[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(10): 1158-1166.]
[22] Zhao L J, Yin L, Xiao H L, et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe river basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(4): 406–416.
[23] Wu J K, Ding Y J, Yang J H, et al. Spatial variation of stable isotopes in different waters during melt season in the Laohugou glacial catchment, Shule river basin[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13 (8): 1453-1463.
[24] Guo X Y, Feng Q, Liu W, et al. Stable isotopic and geochemical identification of groundwater evolution and recharge sources in the arid Shule river basin of northwestern China[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(22): 4703-4718.
[25] Wang L H, Li G M, Dong Y H, et al. Using hydrochemical and isotopic data to determine sources of recharge and groundwater evolution in an arid region: a case study in the upper-middle reaches of the Shule river Basin, northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(4):1901-1915.
[26] Zhou J X, Wu J K, Liu S W, et al. Hydrograph separation in the headwaters of the Shule river basin: Combining water chemistry and stable isotopes[J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015(2): 1-10.
[27] Jia W X, Xu X T, Yuan R F, et al. Variation characteristics of stable isotopes in precipitation and the environmental factors that influence them in the Shiyang river basin of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(10):306-319.
[28] 王帅，饶文波，金可，等. 阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 411-419. [Wang Shuai, Rao Wenbo, Jin Ke, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(5): 411-419.]
[29] 侯典炯，秦翔，吴锦奎，等. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究[J]. 干旱区资源与环境，2011, 25(10): 136-142.[Hou Dianjiong, Qin Xiang, Wu Jinkiu, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation and the water vapor sources in Urumqi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 136-142.]
[30] 吐尔逊江·艾莎，海米提·依米提，古丽娜尔·哈历别克，等. 塔里木盆地降水中稳定同位素变化特征浅析—以和田地区为例[J].安徽农业科学，2012, 40(4): 2163-2165.[Tursunjan·Aysa, Haimiti Yimiti, Gulinaer Halibieke, et al. Analysis on variation characteristics of stable isotopes in the precipitation of Tarim Basin[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(4): 2163-2165.]

[31] 吴军年, 王红. 张掖大气降水的 $\delta^{18}O$ 特征及水汽来源[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(3): 1601-1604.[Wu Junnian, Wang Hong. Characteristics of the $\delta^{18}O$ in precipitation and water vapor source in Zhangye[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(3): 1601-1604.]
[32] IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation[OL]. The GNIP Database. http://www.iaea.org/water, 2006.
[33] 宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 等. 基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络[J]. 地球科学进展, 2007, 22(7): 738-747.[Song Xianfang, Liu Jianrong, Sun Xiaomin, et al. Establishment of Chinese network of isotopes in precipitation(CHNIP) Based on CERN[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(7): 738-747.]
[34] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}O$ 的特征及水汽来源[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 12-22.[Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation over northwest China and its water vapor sources[J]. Acta Geographica Sinica, 2008,63 (1): 12-22.]
[35] 吴锦奎, 杨淇越, 丁永建, 等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1857-1866.[Wu Jinkui, Yang Qiyue, Ding Yongjian, et al. Variations and simulation of stable isotopes in precipitation in the Heihe river basin[J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 1857-1866.]
[36] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2784-2790. [Zhu Jianjia, Chen Hui, Gong Guoli. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in Eastern Qaidam Basin[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2784-2790.]
[37] 郭小燕, 冯起, 李宗省, 等. 敦煌盆地降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 715-723.[Guo Xiaoyan, Feng Qi, Li Zongxing, et al.Variation of stable isotopes and moisture sources in precipitation at the Dunhuang Basin in Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 715-723.]
[38] 桂娟, 李宗省, 冯起, 等. 古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义[J].环境科学, 2019, 40(1): 149-156.[Gui Juan, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Space-time characteristics and environmental significance of the stable isotopes in precipitation in the Gulang River basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 149-156.]
[39] 冯芳, 冯起, 刘贤德, 等. 祁连山排露沟流域降水 $\delta^{18}O$ 和 δD 特征及水汽来源[J].中国沙漠, 2017, 37(5): 997-1005.[Feng Fang, Feng Qi, Liu Xiande, et al.Characteristics of $\delta^{18}O$ and δD in precipitation and moisture sources of Pailugou Catchment in the Qilian Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(5): 997-1005.]
[40] Jia W X, Ma X G, Xu X T, et al. Composition of stable isotope in precipitation and its influences by different vapor sources in the eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(10): 2207-2217.
[41] Li Z X, Feng Q, Yong S, et al. Stable isotope composition of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling Mountain, northwestern China [J]. Atmospheric Research, 2016, 182:87-101.
[42] Zhu G F, Guo H W, Qin D H, et al. Contribution of recycled moisture to precipitation in the monsoon marginal zone: Estimate based on stable isotope data [J]. Journal of Hydrology, 2019, 569:423-435.
[43] Zhao W, Ma J Z, Gu C J, et al. Distribution of isotopes and chemicals in precipitation in Shule River basin, northwestern China: an implication for water cycle and groundwater recharge[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(6): 973-985.
[44] 李永格, 李宗省, 冯起, 等. 托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2661-2672.[Li Yongge, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Environmental significance of the stable isotopes in precipitation at different altitudes in the Tuolai River basin[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2661-2672.]
[45] 刘小康, 饶志国, 张肖剑, 等. 天山地区大气降水氧同位素的影响因素及其对西风环流变化的指示意义[J].地理学报, 2015, 70(1): 97-109.[Liu Xiaokang, Rao Zhiguo, Zhang Xiaojian, et al. Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the Westerly circulation[J].Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 97-109.]
[46] Wang X Y, Li Z Q, Tayier R, et al. Characteristics of atmospheric precipitation isotopes and isotopic evidence for the moisture origin in Yushugou River basin, Eastern Tianshan Mountains, China[J]. Quaternary International,

2015, 380-381:106-115.
[47] 周盼盼. 乌鲁木齐河流域云下二次蒸发效应对降水稳定氢氧同位素的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017.[Zhou Panpan. Effects of below-cloud secondary evaporation for stable hydrogen and oxygen isotopes in Urumqi River Basin[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017.]
[48] Malygina N S, Eirich A N, Barlyeva T V, et al. Isotope composition of macrocirculation processes responsible for precipitation in the Altai mountains[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 211(1): 1315-1755.
[49] Hao S, Li F D, Li Y H, et al. Stable isotope evidence for identifying the recharge mechanisms of precipitation, surface water, and groundwater in the Ebinur Lake basin[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657:1041-1050.
[50] 孙从建, 张子宇, 李捷, 等. 青藏高原西北部大气降水稳定同位素时空特征变化[J]. 山地学报, 2018, 36(2): 217-228.[Sun Congjian, Zhang Ziyu, Li Jie, et al. Temporal and spatial characteristics of stable isotopes of atmospheric precipitation in the northwestern Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 36(2): 217-228.]
[51] Rao W B, Zhang W B, Yong B, et al. Identifying the source of atmospheric moisture over arid deserts using stable isotopes (^{2}H and ^{18}O) in precipitation[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(3): 436-449.
[52] IAEA.Statistical Treatment of Environmental Isotope Data in Precipitation[OL]. Tech. Rept. http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html, 1981.
[53] 李晖, 蒋忠诚, 王月, 等. 新疆地区大气降水中稳定同位素的变化特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 157-161.[LI Hui, JIANG Zhongcheng, WANG Yue, et al. Variation characteristics of stable isotopes in the precipitation of Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 157-161.]
[54] Liu J R, Song X F, Sun X M, et al. Isotopic composition of precipitation over Arid Northwestern China and its implications for the water vapor origin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(2): 164-174.
[55] 童佳荣, 周明亮, 孙自永, 等. 基于 δD、$\delta^{18}O$ 同位素和 HYSPLIT4 气团轨迹模型的黑河上游降水水汽来源研究[J].干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 151-156.[Tong Jiarong, Zhou Mingliang, Sun Ziyong, et al. Water vapor sources precipitation in the upper reaches of Heihe River: Evidence from stable water isotopes and air mass trajectory model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(7): 151-156.]
[56] 李宗杰, 宋玲玲, 田青. 河西走廊东段大气降水特征及水汽来源分析[J]. 环境化学, 2016, 35(4): 721-731.[Li Zongjie, Song Lingling, Tian Qing. Analysis of precipitation characteristics and water vapor sources in the east of Hexi Corridor[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(4): 721-731.]
[57] Jin K, Rao W B, Tan H B, et al. H-O isotopic and chemical characteristics of a precipitation-lake water-groundwater system in a desert area[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559:848-860.
[58] Wang S J, Zhang M J, Hughes C E, et al. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2016, 68(1):1-14.
[59] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, et al. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2011, 63(3): 352-359.
[60] 姚檀栋, 孙维贞, 蒲健辰, 等. 内陆河流域系统降水中的稳定同位素—乌鲁木齐河流域降水中 $\delta^{18}O$ 与温度关系研究[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1): 15-22.[Yao Tandong, Sun Weizhen, Pu Jianchen, et al. Characteristics of stable isotope in precipitation in the Inland Area: A case study of the relation between $\delta^{18}O$ in precipitation and temperature in Urumqi River, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(1): 15-22.]
[61] 孙从建, 张子宇, 陈伟, 等.亚洲中部高山降水稳定同位素空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 19-28.[Sun Congjian, Zhang Ziyu, Chen Wei, et al. Spatial distribution of precipitation stable isotopes in the alpine zones in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 19-28.]

[62] 李晖，蒋忠诚，周宏飞，等. 准噶尔盆地降水、土壤水和地下水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化特征——以中国生态系统研究网络阜康站为例[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 105-108. [Li Hui, Jiang Zhongcheng, Zhou Hongfei, et al. Variation characteristics of oxygen and hydrogen stable isotope in precipitation, soil water and groundwater in the Junggarbasin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(5): 105-108.]

[63] Sun C J, Chen Y L, Li J, et al. Stable isotope variations in precipitation in the northwesternmost Tibetan Plateau related to various meteorological controlling factors[J]. Atmospheric Research, 2019, 227: 66-78.

[64] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, et al. Contributions of local terrestrial evaporation and transpiration to precipitation using $\delta^{18}O$ and D-excess as a proxy in Shiyang inland river basin in China[J]. Global and Planetary Change, 2016, 146: 140-151.

[65] 张明军，马潜，李亚举，等. 季风边缘区降水中 $\delta^{18}O$ 变化特征及水汽来源分析——以兰州市为例[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2011, 47(6): 80-86,93. [Zhang Mingjun, Ma Qian, Li Yaju , et al. Research of isotopic characteristic in precipitation and water vapor origin at the edge of monsoon region: A case study of Lanzhou City[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2011, 47(6): 80-86,93.]

[66] 张自超，丁悌平. 关于同位素地质测试数据的数据处理及结果表示[J]. 岩矿测试，2000，19(1): 77-79.[Zhang Zichao, Ding Tiping. Data processing and expression for analytical results in isotope geology[J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, 19(1): 77-79.]

[67] 黄锦忠，谭红兵，王若安，等. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究[J]. 水文, 2015, 35(1): 33-39,50. [Huang Jinzhong, Tan Hongbing, Wang Ruoan, et al. Hydrogen and oxygen isotopic analysis of perennial meteoric water in Northwest China[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(1): 33-39,50.]

[68] Wang S J, Zhang M J, Chen F L, et al. Comparison of GCM-simulated isotopic compositions of precipitation in arid central Asia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(7): 771-783.

[69] 李佳芳，石培基，朱国锋，等. 河西走廊中部大气降水 $\delta^{18}O$ 变化特征及水汽输送[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 947-955. [Li Jiafang, Shi Peiji, Zhu Guofeng, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and moisture transports in the central Hexi Corridor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(4): 947-955.]

[70] Liu Z F, Tian L D, Chai X R, et al. A model-based determination of spatial variation of precipitation $\delta^{18}O$ over China[J]. Chemical Geology, 2007, 249:203-212.

[71] 刘洁遥，张福平，冯起，等. 西北地区降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 应用生态学报，2018, 29(5): 1479-1488.[Liu Jieyao, Zhang Fuping, Feng Qi, et al. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 1479-1488.]

[72] Zhang M J, Wang S J. Precipitation isotopes in the Tianshan Mountains as a key to water cycle in arid central Asia[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2018, 10(1): 27-37.

[73] 刘进达，刘恩凯，赵迎昌，等. 影响中国大气降水稳定同位素组成的主要因素分析[J]. 勘察科学技术, 1997, (4): 14-18.[Liu Jinda, Liu Enkai, Zhao Yingchang, et al. Analysis of the chief factors influencing the stability isotope composition of China atmospheric precipitation[J]. Site Investigation Science and Technology, 1997, (4): 14-18.]

[74] 王圣杰，张明军. 新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J]. 第四纪研究，2017，37(5): 1119-1130.[Wang Shengjie, Zhang Mingjun. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of stable isotopes in precipitation across the Chinese Tianshan Mountains[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(5): 1119-1130.]

[75] 周海，赵文智. 河西走廊典型荒漠区土壤水分对降水脉动响应的稳定同位素分析[J].中国沙漠，2016, 36(6): 1637-1645.[Zhou Hai, Zhao Wenzhi. Response of soil moisture to precipitation pulse by stable isotope in Desert Area of the Hexi Corridor[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1637-1645.]

[76] 赵玮. 疏勒河流域大气降水同位素特征及水汽来源研究[D]. 兰州：兰州大学, 2017.[Zhao Wei. Study on the isotopes and moisture source in precipitation in the Shule river basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

[77] Wang S J, Zhang M J, Crawford J, et al. The effect of moisture source and synoptic conditions on precipitation isotopes in arid central Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(5): 2667-2682.
[78] Guo X Y, Feng Q, Wei Y P, et al. An overview of precipitation isotopes over the Extensive Hexi Region in NW China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8: 4365-4378.
[79] Ma J Z, Zhang P, Zhu G F, et al. The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang river system, northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 436-437:92-101.
[80] Ma X G, Jia W X, Zhu G F, et al. Stable isotope composition of precipitation at different elevations in the monsoon marginal zone[J]. Quaternary International, 2018, 493: 86-95.
[81] Kong Y L, Pang Z H. A positive altitude gradient of isotopes in the precipitation over the Tianshan Mountains: Effects of moisture recycling and sub-cloud evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 222-230.
[82] 高志发. 西北地区大气降水、地表水及地下水同位素组成特征探讨[J]. 甘肃地质学报，1993，2(2): 94-101.[Gao Zhifa. Discussion on feature of isotope component from atmospheric water, ground water and underground water in Northwest Area, China[J]. Acta Geologica Gansu, 1993, 2(2): 94-101.]
[83] 卫克勤，林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学，1994，23(1): 33-41.[Wei Keqin, Lin Ruifen. The Influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China[J]. Geochimica, 1994, 23(1): 33-41.]
[84] Zhou S Q, Nakswo M, Sakai A, et al. Water isotope variations in the snow pack and summer precipitation at July 1 Glacier, Qilian Mountains in northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(21): 2963-2972.
[85] 李亚举，张明军，王圣杰，等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. 冰川冻土，2011，33(3): 624-633.[Li Yaju, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Progress of the research of stable isotope in precipitation in China: A review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 624-633.]
[86] 李晖，周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 δD 和 δ^{18}O 的变化特征[J]. 干旱区资源与环境，2007，21(9): 46-50.[Li Hui, Zhou Hongfei. Variation characteristics of δD and δ^{18}O stable isotopes in the precipitation of Urumqi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(9): 46-50.]
[87] Wang S J, Zhang M J, Che Y J, et al. Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid central Asia: A stable isotope approach[J]. Water Resources Research, 2016, 52(4): 3246-3257.
[88] 任雯，郑新军，吴雪，等. 云下二次蒸发对降水过程中氢氧稳定同位素构成的影响[J]. 干旱区研究，2017, 34(6): 1263-1270.[Ren Wen, Zheng Xinjun, Wu Xue, et al. Effect of below-cloud secondary evaporation on stable isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation over the east of Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1263-1270.]
[89] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
[90] Rozanski K, Araguas-Araguas L, Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation[M]. Washington DC: American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 1993.
[91] Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. Boca Raton, FL: CRC Press/Lewis Publishers, 1997.
[92] 刘元章，王树芳，王丽亚，等. 一种获取地区大气降水线方程(LMWL)的简单方法——以北京平原为例[J]. 水文, 2016, 36(5): 39-45.[Liu Yuanzhang, WANG Shufang, WANG Liya, et al. A simple method of obtaining local meteoric water line (LMWL) equation: a case study in Beijing Plain[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(5): 39-45.]
[93] 黄天明，聂中青，袁利娟. 西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J]. 干旱区资源与环境，2008, 22(8): 76-81.[Huang Tianming, Nie Zhongqing, Yuan Lijuan. Temperature and geographical effects of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in west of China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(8): 76-81.]

[94] 程中双，张永波. 不同水汽源控制下的降水同位素分布特征[J]. 勘察科学技术，2015,(1): 25-31.[Cheng Zhongshuang, Zhang Yongbo. Distribution characteristics of precipitation isotope controlled by different moisture sources[J]. Site Investigation Science and Technology, 2015,(1): 25-31.]
[95] Friedman I, Machta L, Soller R. Water-vapor exchange between a water droplet and its environment [J]. Journal of Geographical Research, 1962, 67(7): 2761-2766.
[96] 章新平，姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系研究[J]. 冰川冻土，1996，18(4): 74-79.[Zhang Xinping, Yao Tandong. Relations between δD and $\delta^{18}O$ in precipitation at present in the Northeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(4): 74-79.]
[97] Wang S J, Zhang M J, Hughes C E, et al. Meteoric water lines in arid Central Asia using event-based and monthly data[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 435-445.
[98] Li Z J, Li Z X, Yu H C, et al. Environmental significance and zonal characteristics of stable isotope of atmospheric precipitation in arid Central Asia[J]. Atmospheric Research, 2019, 227: 24-40.
[99] Feng F, Feng Q, Liu X D, et al. Stable isotopes in precipitation and atmospheric moisture of Pailugou Catchment in northwestern China's Qilian Mountains[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(1): 97-109.
[100] Wu J K, Ding Y J, Ye B S, et al. Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1123-1134.
[101] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(C8): 5029.
[102] Cui B L, Li X Y. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2015, 527-528:26-37.
[103] 王军，刘天仇，尹观. 西藏雅鲁藏布江中、下游地区大气降水同位素分布特征[J]. 地质地球化学, 2000, 28(1): 63-67.[Wang Jun, Liu Tianchou, Ying Guan. Characteristics of isotope distribution in precipitation in the middel-lower reaches of Yarlung Zangbo River[J]. Geology-Geochemistry, 2000, 28(1): 63-67.]
[104] 张生春. 陕西省现代大气降水氢氧同位素组成特征研究[J]. 陕西地质，1989，7(2): 57-66.[Zhang Shengchun. Characteristics of hydrogen-oxygen isotope compositions of contemporarily atmospheric sedimentation in Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 1989, 7(2): 57-66.]
[105] Froehlich K, Gibson J, Aggarwal P. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2002:1-23.
[106] 冯芳，李忠勤，金爽，等. 天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}O$ 和 δD 特征及水汽来源分析[J].水科学进展，2013，24(5): 634-641.[Feng Fang, Li Zhongqin, Jin Shuang, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ and δD in precipitation and its water vapor sources in the upper Urumqi River Basin, Eastern Tianshan[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 634-641.]
[107] Wang S J, Zhang M J, Che Y J, et al. Influence of below-cloud evaporation on deuterium excess in precipitation of Arid Central Asia and its meteorological controls[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(7): 1973-1984.
[108] 谢泽明. 新疆降水的水汽来源特征分析研究[D]. 成都：成都信息工程大学，2018.[Xie Zeming. Analysis of water vapor source characteristics of precipitation in Xinjiang[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2018.]
[109] 牟惟丰. 我国干旱地区大降水天气过程水汽来源[J]. 应用气象学报，1991，2(3): 308-314.[Mu Weifeng. A review on the supply of water vapour to heavy rain process in Arid Regions of China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1991, 2(3): 308-314.]
[110] Tian L D, Yao T D, Macclune K, et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D10): D10112.
[111] 袁瑞丰，李宗省，蔡玉琴，等. 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义[J]. 环境科学，

2019, 40(5): 1-15.[Yuan Ruifeng, Li Zongxing, Cai Yuqin, et al. Space-time characteristics and environmental significance of the stable isotopes in precipitation at the Arid Inland River Basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 1-15.]
[112] 赵鹏，徐先英，屈建军，等. 石羊河下游青土湖大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J].干旱区资源与环境，2019，33(3): 80-85.[Zhao Peng, Xu Xianying, Qu Jianjun, et al. Characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation in Qingtu Lake area, at lower reaches of shiyanghe river and its water vapor sources[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3): 80-85.]
[113] 张应华，仵彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析[J]. 干旱区地理，2008，31(3): 403-408.[Zhang Yinghua, Wu Yanqing. Precipitation from different water vapor sources in the Heihe River Basin, China[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(3): 403-408.]
[114] 马兴刚，贾文雄，丁丹，等. 祁连山东部大气降水 $\delta^{17}O$ 变化特征及水汽输送[J]. 干旱区地理，2019，42(3):517-525.[Ma Xinggang, Jia Wenxiong, Ding Dan, et al. Variation characteristics of atmospheric precipitation $\delta^{17}O$ and water vapor transport in Eastern Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3):517-525.]
[115] Li Z X, Gao Y, Wang Y M, et al. Can monsoon moisture arrive in the Qilian Mountains in summer?[J]. Quaternary International, 2015, 358: 113-125.
[116] 宋玲玲，李宗杰，田青. 甘肃省武威市大气降水特征及水汽来源[J]. 中国沙漠，2016，36(6): 1679-1688.[Song Lingling, Li Zongjie, Tian Qing. Precipitation characteristics and the water vapor source in Wuwei, Gansu, China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1679-1688.]
[117] 张亚宁，张明军，王圣杰，等. 基于比湿订正拉格朗日模型的新疆短时强降水的水汽来源[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3):698-711.[Zhang Yaning, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Moisture source for short-time heavy rainfall in Xinjiang based on specific humidity-adjusted lagrangian model[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3):698-711.]

Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the arid regions of the northwestern China: A review

ZENG Di[1,3], WU Jin-kui[1,2,3*], Mu Ya-qiong[1,3], LI Hong-yuan[1,3], ZHAO Qiu-dong[1,2], LIU Shi-wei[2,3]， QIN Jia[1,2]

(1.Laboratory of Watershed Hydrology and Ecology, Northwest Institute of Ecology and Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000,Gansu,China；2.State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Ecology and Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu,China；3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100020, China)

Abstract: Based on the relevant research literatures mainly in recent years, the hydrogen and oxygen isotope characteristics and related scientific affairs in precipitation in the arid regions of Northwestern China (ARNC) were reviewed. The main conclusions are as follows: (1) The stable isotopes in precipitation in ARNC show significant seasonal variation. The values are higher in the summer and lower in the winter, which fully reflects the temperature effect of the isotope distribution. From the spatial distribution perspective, the lower values of stable isotopes are mainly distributed in the mountainous areas such as the Tianshan Mountainous area, whereas higher values occur in the basin areas; (2) The air temperature is the main controlling factor of the isotope composition of precipitation in ARNC. Precipitation amount effect exists in summer in

some areas of the event precipitation. Geographical factors and water vapor sources have regional distribution diversities in precipitation isotopes; (3) The slopes and intercepts of the Local Meteoric Water Line (LMWL) in ARNC are relatively low, showing the climate characteristics of arid regions on the whole. But in different areas, the different characteristics of slopes/ intercepts is also significant; (5) The variation range of d-excess in precipitation is large, and some stations higher in winter and lower in summer. However, due to the strong evaporation in summer, some stations also exhibit the characteristics of lower in winter and higher in summer; (6) The main source of water vapor is transmitted by the westerly wind, and also affected by monsoon and the polar air masses.

Key words: atmospheric precipitation; hydrogen and oxygen isotope; temporal and spatial distribution; source of water vapor; arid region of northwestern China

收稿日期：2019-09-10；**修回日期：**2019-11-30

基金项目：国家自然科学基金面上项目（41730751，41771084）资助

作者简介：曾帝（1996－），硕士研究生，研究方向为寒旱区水文. E-mail: zengdi@lzb. ac.cn

通讯作者：吴锦奎. E-mail: jkwu@lzb.ac.cn